مجله به‌نژادی نهال و بذر
جلد ۱-۳۴، شماره ۴، سال ۱۳۹۷

ارزیابی مزرعه‌ای مقاومت تدریجی نسبت به بیماری زنگ زرد جو در لاین‌های امیدبخش جو آبی

Field-Based Assessment of Slow Rusting Resistance Against Yellow Rust in Irrigated Barley Promising Lines

صفرعلی صفوی[۱]، حبیب‌اله قزوینی[۲] و جاوید محمدزاده[۳]

۱- اســـتادیار، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشـــاورزی و منابع طبیعی اردبیل، ســـازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران.
۲- دانشیار، مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران.
۳- پژوهشـــگر، بخش تحقیقات علوم زراعی و باغی، مرکز تحقیقات و آموزش کشـــاورزی و منابع طبیعی اردبیل، ســـازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، اردبیل، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۲/۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۹/۱۶

چکیده

صـــفوی، ص. ع.، قزوینی، ح. و محمدزاده، ج. ۱۳۹۷. ارزیابی مزرعه‌ای مقاومت تدریجی نســـبت به بیماری زنگ زرد جو در لاین‌های امیدبخش جو آبی. **مجله به‌نژادی نهال و بذر ۱-۳۴: ۳۷۶-۳۵۵.**

بیماری زنگ زرد جو با عامل *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei* یکی از مهمترین بیماری‌های جو می‌باشد که تولید جو را در برخی مناطق جهان تهدید می‌کند. استفاده از ارقام مقاوم، اقتصادی‌ترین روش مدیریت زنگ زرد است و مقاومت تدریجی (Slow rusting) که نوعی مقاومت کمی است، به عنوان مقاومت پایدار گزارش شده است. در این مطالعه، پارامترهای مقاومت تدریجی شامل ضریب آلودگی (CI)، شدت نهائی بیماری (FRS)، مقدار نسبی سطح زیر منحنی پیشرفت بیماری (rAUDPC) و نرخ آلودگی ظاهری (*r*) برای ۴۱ ژنوتیپ جو همراه با شاهد حساس در دو سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶ ارزیابی شدند. این پژوهش در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اردبیل تحت شرایط آلودگی طبیعی و مصنوعی انجام شد. واکنش گیاهچه‌ای نیز تحت شرایط مزرعه‌ای ارزیابی شد. نتایج ارزیابی‌ها برای پارامترهای مقاومت نشان داد که لاین‌های EDC-87-3 ، EC-90-4 ، EM-88-2 ، EM-88-5 ،EM-89-19 همراه با رقم حساس بالاترین مقادیر FRS، CI، *r* و rAUDPC را داشتند، بنابراین به عنوان لاین‌های حساس گروه‌بندی شدند. ده لاین در هر دو مرحله گیاهچه‌ای و گیاه بالغ مقاوم بودند. هفت لاین در مرحله گیاهچه‌ای مقاوم ولی در مرحله گیاه بالغ واکنش حدواسط (MS، M و MR) نشان دادند. سیزده لاین (۲، ۵، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۹، ۲۳، ۲۹، ۳۱، ۳۸ و۳۹) در مرحله گیاهچه‌ای حساس ولی در مرحله گیاه بالغ واکنش متوسط (MR, M, MS) نشان دادند. بنابراین این لاین‌ها با داشتن مقادیر پایین پارامترهای مختلف مقاومت به احتمال زیاد دارای درجات متفاوتی از مقاومت تدریجی یا مقاومت گیاه بالغ در درجه حرارت بالا (HTAP) (مقاومت غیر نژاد- اختصاصی) می‌باشند. بقیه لاین‌ها سطح پایینی از مقاومت تدریجی داشتند. تجزیه خوشه‌ای بر اساس واکنش گیاهچه‌ای و گیاه بالغ، لاین‌ها را در گروه‌های مختلفی قرار داد که این حالت نیز بیانگر تنوع بالای لاین‌ها از نظر واکنش نسبت به بیماری زنگ زرد جو بود.

واژه‌های کلیدی: جو، زنگ زرد، مقاومت گیاهچه‌ای، مقاومت گیاه بالغ، مقاومت تدریجی.

نگارنده مسئول: safaralisafavi@yahoo.com تلفن: ۰۴۵۱۶۶۳۴۰۷

مقدمه

جو (*Hordeum vulgare* L.) یکی از مهمترین محصولات غله‌ای است که در سطح بیش از ۴۶/۹ میلیون هکتار در جهان و ۱/۶۱۱ میلیون هکتار در ایران کشت می‌شود (Anonymous, 2016)، و اساساً برای تعلیف دام، غذای انسان و تهیه مالت در بسیاری از کشورها استفاده می‌شود (Newman and Newman, 2006). این محصول غله‌ای سازگاری خوبی به نواحی خشک و خاک‌های ضعیف داشته و اغلب در نظام‌های تولید با عملکرد پایین کشت می‌شود.

تنش‌های زنده، بویژه زنگ زرد (*P. Striiformis* f. sp. *hordei*)، باعث کاهش عملکرد جو می‌شود. این بیماری همه‌گیری‌های شدیدی را در آسیای جنوبی و شرقی (هند، نپال، پاکستان، بنگلادش، ژاپن و چین) (Bahl and Bakshi, 1963; Chen *et al*., 1995; Lutra and Chopra, 1990)، غرب آسیا (Dubin and Stubbs, 1986)، شرق آفریقا (Stubbs, 1985)، آمریکای جنوبی (Capettini, 2005) و آمریکای شمالی (Chen, 2007, 2008) سبب شده است. برخی همه‌گیری‌های شدید و مهم زنگ زرد سبب کاهش قابل ملاحظه عملکرد بین ۳۰ تا ۷۰ درصد در محصول جو در آمریکای جنوبی شد (Dubin and Stubbs, 1986).

این بیماری از ایران ابتدا توسط اسفندیاری در سال ۱۳۲۶ گزارش شد (Esfandiari, 1947). بیماری مذکور در ایران در برخی نقاط به ویژه استان‌های اردبیل، خراسان، فارس و خوزستان موجب خسارت می‌شود (Safavi *et al*., 2014). در یک بررسی انجام شده توسط صفوی و همکاران (Safavi *et al*., 2012) کاهش اجزاء عملکرد ناشی از بیماری زنگ زردجو در اردبیل روی ارقام حساس و ارقام دارای مقاومت تدریجی (Slow rusting resistance) به ترتیب ۵۰٪ و ۲۰ ٪ برآورد شد.

بکارگیری مقاومت پایدار سودمندترین، موثرترین و از لحاظ زیست محیطی سالم‌ترین روش مدیریت زنگ زرد است (Park, 2008). در زنگ‌های غلات، به طور کلی دو نوع مقاومت شرح داده شده است که شامل مقاومت گیاهچه‌ای (Seedling\All-stage resistance = ASR) و مقاومت گیاه بالغ (Adult plant resistance = APR) می‌باشد (Gyamwali *et al*., 2018). ثابت شده است که مقاومت گیاهچه‌ای در تمام مراحل رشدی گیاه موثر می‌باشد و اغلب با واکنش فوق حساسیت (hypersensitive) در گیاه همراه است، در حالی که مقاومت گیاه بالغ (APR) تنها در مرحله گیاه بالغ موثر بوده و اغلب به‌عنوان مقاومت تدریجی (Slow rusting) نیز در نظر گرفته می‌شود (Park, 2008).

چندین مطالعه در خصوص ژنتیک مقاومت گیاهچه‌ای و گیاه بالغ نسبت به زنگ قهوه‌ای

جو با عامل *P. hordei* انجام شـــده اســـت، در حالیکه اطلاعات اندکی در خصـــوص مقاومت گیاه بالغ نســـبت به زنگ زرد جو وجود دارد. برای مثال، چندین ژن مقاومت گیاهچه‌ای نسبت به *P. hordei* که باعث ایجاد مقاومت بالایی مـی‌شـــونـد مـانـنـد *Rph1* و *Rph19* (Golegaonkar, 2009) و *Rph21* (Sandhu *et al.*, 2012) و *Rph22* (Niks, 2013) گزارش شده است.

اخـیـراً بـرخـی مـحـقـقـیـن (Dracatos *et al.*, 2016; Esvelt Klos *et al.*, 2016)، جایگاه‌های ژنی کمی (QTL) مقاومت به زنگ زرد جو را در مرحله گیاهچه‌ای با به کارگیری نژاد های زنگ زرد آمریکای شـــمالی و اروپا تعیین کردها ند. اغلب مقاومت گیاهچه‌ای با ژن‌های بزرگ اثر به صـــورت آلل‌های غالب و در مواقعی نیز توســـط آ لل های مغلوب کنترل می‌شـــوند. عواملی همچون جهش‌های زیاد در ژن‌های بیماریزایی زنگ‌ها غالباً منجر به شکست ژن های مســـئول مقاومت در میزبان در عرض مدت کوتاهی بعد از به کارگیری آنها می‌شـــوند (Park, 2008). در مقابل، مقاومت گیاه بالغ که اغلب ماهیت کمی هم دارد و به عنوان مقاومت ناقص یا تدریجی نیز از آن نام برده می شـــود، غالباً با اثر افزایشـــی (additive effect) همراه اســـت (Singh *et al.*, 2015). بنابراین ژن‌های مقاومت از نوع مقاومت گیاه بالغ برای مدت طولانی‌تری نســـبت به عوامل بیماریزای زنگ موثر باقی می‌مانند (Singh *et al.*, 2011).

بیست و شش ژن مقاومت *Rps* برای مقاومت به زنگ زرد جو تا سال ۲۰۰۳ میلادی شناسائی و بـــه‌کـــار گـــرفـــتـــه شـــــدنـــد (Chen and Line, 2003). با وجود این، بیشـتر این ژن‌ها نژاد- اختصـــاصـــی بوده و در کنترل جمعیت های بیمارگر در نتیجه ظهور نژاد های جدید غیر موثر خواهند شـــد. میانگین طول عمر ژن‌های مقاومت نژاد- اختصـــاصـــی در ســـطح جهـانی پنج ســـال برآورد شـــده اســـت (Kilpatric, 1975).

برای مثـال ژن‌هـای *Yr2*، *Yr3*، *Yr4*، *Yr6*، *Yr7*، *Yr9* و *YrA* به طور وســـیعی در برنامه‌های به‌نژادی گندم مرکز بین‌المللی تحقیقات ذرت و گنـدم (CIMMYT) برای مقـاومـت بـه زنـگ زرد گـنـدم بـه کـار گـرفـتـه شـــدهانـد (Badebo *et al.*, 1990). اما، هیچ یک از این ژن‌ها طی ســـال‌های اخیر در ســـطح جهانی موثر نـبـوده‌انـد (Sharma-Poudyal *et al.*, 2013; Broers *et al.*, 1996). دو نوع مقاومت کمی، یعنی مقـاومـت تـدریجی (Slow rusting) و مقـاومـت گیـاه بـالغ در درجـه حرارت بـالا (High Temperature Adult Plant Resistance = HTAPR) به طور وســـیعی بررســـی و مطالعه شـــده‌اند که گزارش‌ها حاکی از ماهیت پیچیده ژنتیکی این نوع مقاومت‌ها می‌باشد (Line, 2002).

در بسیاری از پاتو سیستم‌های زنگ- غلات، مفاهیم کمی مقاومت ارقام تشریح شده و مقادیر آن در مرحله گیاه بالغ با اندازه‌گیری شـــدت بیماری در مرحله مشـــخصـــی از رشـــد گیاه،

سطح زیر منحنی پیشرفت بیماری (Area Under Disease Progress Curve =AUDPC)، نرخ آلودگی ظاهری (Apparent Infection Rate) و متوسط ضریب آلودگی برآورد می‌شوند (Broers *et al*., 1996; Pathan and Park, 2006). محققان با استفاده از این پارامترها مقادیر کمی مقاومت ارقام و لاین‌ها را در سطح مزرعه مشخص کرده‌اند (Sandoval-Islas *et al*., 2007; Ali *et al*., 2009b; Shah *et al*., 2010; Safavi *et al*., 2010). در بررسی‌های این محققان همبستگی بالای پارامترهای شدت نهائی بیماری، ضریب آلودگی و سطح زیر منحنی پیشرفت بیماری با یکدیگر مشخص گردیده است.

در زمینه ارزیابی مقاومت ارقام و لاین های جو نسبت به زنگ زرد تحقیقات متعددی در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته است. دریک بررسی انجام شده در هندوستان از سالهای ۱۹۸۱ تا ۱۹۸۳ تعداد ۷۰۰ لاین تحت شرایط آلودگی طبیعی ارزیابی شدند که ازمیان آنها ۱۵ لاین عاری از آلودگی، ۱۱ لاین با آلودگی جزیی و مقاوم و بقیه مواد آزمایشی درجات متفاوتی از حساسیت را نشان دادند (Mathur and Siradhana, 1990).

در بررسی دیگری ۵۰۰ لاین پیشرفته حاصل از برنامه های به‌نژادی ICARDA/CIMMYT در مکزیک که در مرحله گیاهچه‌ای و گیاه بالغ ارزیابی شدند، تعداد زیادی از لاین‌های پیشرفته (۸۵/۸٪) درمرحله گیاهچه‌ای واکنش حساسیت نشان دادند، درصورتی که این آلودگی در مرحله گیاه بالغ کمتر بود. نتیجه حاصل از این آزمایش بیانگر این مطلب بود که لاین‌های پیشرفته دارای مقاومت کمی بالایی بودند (Sandoval-Islas *et al* ., 1998). در ارزیابی ژرم پلاسم جو در تگزاس، ارقام Chayton، Boxer، Betzes، Compana، Custer، Vanguard، Barsoy، Hazen، Hudson، Kamiak، Kenate، Keowee، Maury و Norbert مقاومت گیاهچه‌ای از خود نشان دادند (Roelfs and Huerta Espino, 1994).

در تحقیق دیگری در هندوستان در طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۳ از میان ۲۶۹ رقم جو مختلف که در شرایط آلودگی طبیعی و مصنوعی درسه مکان ارزیابی شدند، ۲۶ رقم درجه بالایی از مقاومت یا تحمل به بیمارگر در شرایط مزرعه‌ای از خود نشان دادند و ارقام EB7948, Gaines, RDISN416, EP79A, Ab.14 با واکنش 10R، دارای مقاومت چند ژنی بودند (Gulati *et al*., 1988).

ازسال ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۷ در آزمایشات تعیین واکنش مزرعه‌ای بیش از۴۴ هزار لاین نسبت به زنگ زرد جو در بولیوی، ایالت کلرادو (آمریکا)، اکوادور، آلمان، مکزیک و پرو ارزیابی شدند. لاین های جو مقاوم در تمام مکان‌ها در سال دوم نیزکاشته شدند. در نهایت ارقام مختلف از جمله Bancroft در سال ۲۰۰۰

معرفی شـــدند (Brown et al., 2001b). در مطالعه دیگری در نپال مشـــخص گردیده اســـت که جوهای دوردیفه مقاومت بیشـــتری نسـبت به بیماری زنگ زرد در مقایســـه با جوهای شـــش ردیفه داشـــتند و اســـتفاده از ارقام جو دوردیفه و مقاوم به بیماری یک روش عملی برای افزایش تولید و پایداری عملکرد جو در نپال توصیه شده است (Sherchand and Yoshida, 1996).

در آمریکا ارقامی نظیر Bancroft، Tango، Kold و Strider که چندین ســـال قبل معرفی شـــده‌اند، دارای مقاومت بهتری نسـبت به زنگ زرد جو هســـتند و برخی دیگر نظیر Baronesse دارای مـقـاومـت تـدریـجـی مـی‌بـاشـــنـد (Line, 2002). ارقـام مقـاوم دیگری مـاننـد IBTA-8 در بـولـیـوی، Teran در اکـوادور و UNA-80 در پرو که در اواخر ۱۹۷۰ و اوایل ۱۹۸۰ معرفی شدند، مدت طولانی‌تری نسبت به زنگ زردجو مقاوم بودند که بیانگر طبیعت پـایـدار مقـاومـت کمی در این ارقـام اســـت (Sandoval-Islas *et al*., 1998).

در ایران نیز تحقیقاتی در زمینه ارزیابی ارقام و لاین‌ها نســـبت به زنگ زرد جو انجام گرفته اســـت. در بررســـی تعیین منابع مقاومت جو به بیماری زنگ زرد طی ســـال های ۶۷ تا۷۱ در خراســـان ارقام ارس، اســـتار و ارم مصـــون بودند (Moshiri, 1995). در مطالعه دیگری توســـط صـــفوی و همکـاران (Safavi *et al*., 2013) مقاومت تدریجی ارقام جو مورد بررســـی قرار گرفت که از بین آنها ارقام ماکوئی، دشـــت، فصـــیح و ارس دارای ســـطح مطلوب مقاومت و ارقام والفجر، آبیدر و ســـهند ســـطح متوســـط مقاومت را نشان دادند.

ســـطح زیر منحنی پیشـــرفـت بیمـاری (AUDPC) معیار کمی از کل مقاومت بوده و تمام مولفه های مقاومت نظیر فراوانی آلودگی، دوره نهـان آلودگی، انـدازه اوریـدینیوم و اســـپورزایی و ســـرعـت یـا توقف پیشـــرفـت بیماری را در یک ســـطح، مشـــخص می‌ســـازد (Milus and Line, 1986). عـلـت مـطـالـعـه پارامتر های یاد شـــده در شـــرایط مزرعه‌ای، همبســـتگی پایین (r = 0.5) برخی مولفه های مقاومت تدریجی در شـــرایط گیاهچه‌ای در گلخانه با مولفه‌های مذکور در شـــرایط گیاه بالغ است (Sandoval-Islas *et al*., 2007). از طرف دیگر از آنجا که بیان ژن‌های مقاومت غیر نژاد- اختصـــاصـــی (مانند مقاومت تدریجی) در مرحله گیـاه بـالغ صـــورت می‌گیرد (Singh *et al*., 2011)، بنابراین در بررسی حاضر نیز پارامترهای مقاومت تدریجی در مرحله گیاه بالغ همراه با واکنش گیاهچه‌ای در شـــرایط مزرعه‌ای ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

ارزیابی واکنش گیاهچه‌ای: بررســـی واکنش گیـاهچـه‌ای ۴۱ لاین امیـدبخش جو مربوط بـه اقلیم‌هـای مختلف (جـدول ۱) تحت شـــرایط مزرعـه‌ای بر اســـاس روش زنـگ و همکـاران (Zeng *et al*., 2014) در برابر جمعیتی مرکب

جدول ۱- شجره لاین‌های امیدبخش جو مورد استفاده در ارزیابی پارامترهای مقاومت تدریجی

Table 1. Pedigree of barley promissing lines used for evaluation of slow rusting parameters

شماره No.	کد لاین Line code	شجره Pedigree
1	EC-81-13	Comp 89-9Cr-79-07/Atem//(Alpha/HC1905//Robur)/3/...
2	EC-82-11	Np106/Minn14133-Gvaxduois//Gi10143
3	EC-83-17	MAKOUEE//ZARJOW/80-5151
4	EC-84-10	UnumliArpa/Azhar/Azhar/3/Beacher/UnumliArpa/4/Tsiklon
5	EC-86-14	Radical/Birgit//Pamir-154
6	EC-87-4	Michailo/Dobrinya
7	EC-88-4	Bahtim 7DL/79-W40762//Deir Alla106
8	EC-88-8	Michailo/K-096M3
9	EC-89-16	Pamir-168
10	EC-89-18	Torsh/Legia
11	EDC-87-3	Pamir-149/Victoria
12	EDC-87-7	Pamir-013/Sonata
13	EC-90-4	Ste/L.640//Hml-02/Arabi Abiad*2/3/1-BC-80593
14	EC-90-5	Bereke-54/Alanda
15	EC-90-7	L.1242/ZARJOW//LB.Iran/Una8271//Gloria"S"/Com"S
16	EM-87-10	82S:510/3/Arinar/Aths//DS 29
17	EM-88-2	Kavir/Badia/3/Torsh/9cr.279-07/Bgs/4/Karoon/Kavir
18	EM-88-5	Triton/Yazd-5
19	EM-89-10	ICNB-105960/Torkman
20	EM-89-14	Trompilo//Karoon/Kavir/3/Legia/4/Ashar
21	EM-89-19	Assala'S'//Avt/Aths/3/(Arinar/Aths//D529)
22	MD-87-16	Bda/ Rhihane-03//ICB-107766
23	MD-88-15	Rojo/3/LB.IRAN/Una8271//Gloria"S"/Com"S"
24	MD-88-19	PINON/3/QUINN/ALOE//CARDO/4/CIRU
25	MD-90-10	Ataco/Comino//Aleli/3/Bichy2000/4/Arupo/K8755//Mora
26	MD-90-12	Arbayan/NK1272/4/Arar/3/Mari/Aths*2//M-Att-73-337-1
27	EM-90-3	Beecher/1-BC-80411//1-BC-80593
28	EM-90-14	BIR-24
29	EW-82-5	Beecher-Sel//Gloria"S"/Copal"S"
30	EW-82-13	Scotia/WA1356.70//WA2145.....
31	EW-86-4	Arabian Barley/3/Aths//Md.AT1/CM58-3W-B/4/Teran78
32	EW-86-14	Blu/Mja
33	EW-86-17	Cerraja/3/Rhodes/C114100//Lignee527/4/Delo
34	EW-87-4	Alanda//Lignee 527//Arar/6/Multan/M23/4/Hopro/3/....
35	EW-87-5	Lignee527/Nk1272//JLB70-063/3/Barjouj
36	EW-88-7	Rojo/Sahra
37	EW-88-16	Rojo/Sahra
38	EW-89-5	Anoidium/Arbayan-01/3/Lignee527/NK1272//JLB70-63
39	EW-90-5	CHENG DU 105/4/EGYPT4/TERAN78//P.STO/3/QUINA/5/ABETO//…
40	EW-90-14	GOB/ALELI//CANELA/3/ARUPO*2/JET/4/ARUPO/K8755//MORA
41	EW-90-15	GOB/ALELI//CANELA/3/ARUPO*2/JET/4/ARUPO/K8755//MORA
42	Afzal (Susceptible check)	Yazd-5 (Selection from an Iranian landrace originated from Chah Afzal district, Yazd, Iran)

از نژادهای زنگ زرد جو که دارای پرآزاری بر روی ژن‌های *Rps4*، *rpsHF*، *rpsAst*، *rpsHi1*، *rpsHi2*، *rps2*، *rpsTr1*، *rpsTr2*، *Rps1.c*، *Rps1.b*، *Rps3* و *RpsI5* بودند، انجام شد (Safavi *et al.*, 2014).

این بررسی در فصل بهار سال ۱۳۹۵ در ایستگاه تحقیقات کشاورزی اردبیل (واقع در فاصله ۱۵ کیلومتری جنوب غربی جاده اردبیل-خلخال با طول جغرافیای ۴۸ درجه و ۲۶ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۲۲ دقیقه و ارتفاع

از سطح دریای آزاد ۱۳۳۹ متر) انجام شد. از هرلاین سه گرم بذر روی یک خط ۳۰ سانتی‌متری ا فاصله ۳۰ سانتی‌متر از یکدیگر روی یک پشته کاشته شد و بعد از هر ۱۰ لاین و نیز در کل حاشیه آزمایش روی دو خط نیم‌متری (یک پشته) رقم حساس افضل کشت گردید. آزمایش گیاهچه‌ای در سه تکرار انجام شد.

مایه‌زنی مصنوعی خزانه در زمان دو برگی با مخلوطی از اسپورهای نژادهای زنگ زرد جو جمع‌آوری شده از سال قبل (از خزانه زنگ زرد جو در اردبیل) و پودر تالک (به نسبت ۱ به ۲۰) به کمک گرد پاش و در هنگام غروب انجام گردید.

در زمان ظهور علائم روی رقم حساس (در حد تیپ آلودگی ۷ یا بالاتر) یادداشت‌برداری انجام شد. واکنش گیاهچه‌ای بر اساس معیار ۹-۰ به روش لاین و قیوم (Line and Qayoum, 1992) انجام شد (جدول ۲). در این روش تیپ های آلودگی ۷ یا بیشتر به عنوان حساس و تیپ های آلودگی ۶-۴ متوسط و تیپ‌های آلودگی کمتر از ۴ به عنوان مقاوم در نظر گرفته شدند.

ارزیابی واکنش گیاه بالغ: در بررسی واکنش گیاه بالغ، پارامترهای مختلف مقاومت تدریجی شامل ضریب آلودگی (Coefficient of Infection = CI)، شدت نهائی بیماری (Final Rust Severity = FRS)، مقدار نسبی سطح زیر منحنی پیشرفت بیماری (Relative Area Under Disease Progress Curve = rAUDPC) و نرخ آلودگی ظاهری (Apparent Infection Rate) روی برگ پرچم ارزیابی شد.

در اواسط فصل پاییز ده گرم بذر هر یک از لاین‌ها روی دو خط یک متری با فاصله ۳۰ سانتی متر از یکدیگر روی یک پشته کاشته شدند و بعد از هر ده رقم روی دو خط یک متری (یک پشته) و نیز در کل حاشیه آزمایش از رقم حساس افضل کشت گردید. آزمایش با سه تکرار انجام و در طول فصل زراعی عملیات داشت شامل آبیاری غرقابی، وجین علف‌های هرز، و کودپاشی انجام شد.

مایه‌زنی مصنوعی خزانه در فاصله بین زمان ساقه‌دهی تا قبل از ظهور برگ پرچم با مخلوطی از اسپورهای نژادهای زنگ زرد جو جمع‌آوری شده از سال قبل (از خزانه زنگ زرد جو در اردبیل) و پودر تالک (به نسبت ۱ به ۲۰) به کمک گردپاش و در هنگام غروب (زمانی که رطوبت نسبی ۹۵ درصد و دمای هوا ۱۲ درجه سانتی‌گراد بود) انجام گردید. این ترکیب نژادی قارچ عامل بیماری، بر روی ژن‌های *Rps4*، *rpsHF*، *rpsAst*، *rpsHi1*، *rpsHi2*، *rps2*، *rpsTr1*، *rpsTr2*، *Rps1.c*، *Rps1.b*، *Rps3* و *RpsI5* دارای پرآزاری بود (Safavi *et al.*, 2014).

یادداشت‌برداری از شدت بیماری زنگ زرد در سه تا چهار نوبت و به فاصله هر هفت روز یکبار از زمان ظهور برگ پرچم (Gs47) تا

جدول ۲- توصیف واکنش میزبان و تیپ‌های آلودگی گیاهچه‌ای در ارزیابی مقاومت نسبت به زنگ زرد (Line and Qayoum, 1992)

Table 2. Description of host reaction and seedling infection types in resistance evaluation against barley yellow rust (Line and Qayoum, 1992)

Host reaction	واکنش میزبان	تیپ آلودگی Infection type		علائم برای نوع آلودگی Infection signs and symptoms
		اختصار انگلیسی Acronym	عددی Numerical	
Immune	ایمن	0	0	هیچگونه آلودگی قابل رویت نیست No visible sign and symptoms
Very Resistant	خیلی مقاوم	VR	1	لکه‌های نکروتیک/کلروتیک، بدون اسپورزائی Nectrotic and/ or chlorotic flecks, no sporulation
Resistant	مقاوم	R	2	نوارهای نکروتیک/کلروتیک، بدون اسپورزائی Necrotic and/ or chlorotic blotches or stripes, no sporulation
Moderatley Resistant	نیمه مقاوم	MR	3	نوارهای نکروتیک/کلروتیک، اسپورزائی جزئی Necrotic and/ or chlorotic blotches or stripes, trace sporulation
Low Moderate	متوسط پایین	LM	4	نوارهای نکروتیک/کلروتیک، اسپورزائی کم Necrotic and/ or chlorotic blotches or stripes, light sporulation
Moderate	متوسط	M	5	نوارهای نکروتیک/کلروتیک، اسپورزائی بینابین Necrotic and/ or chlorotic blotches or stripes, intermediate sporulation
High Moderate	متوسط بالا	HM	6	نوارهای نکروتیک/کلروتیک، اسپورزائی متوسط Necrotic and/ or chlorotic blotches or stripes, moderate sporulation
Moderatley Susceptible	نیمه حساس	MS	7	نوارهای کلروتیک/ نکروتیک، اسپورزائی فراوان Necrotic and/ or chlorotic blotches or stripes, abundant sporulation
Susceptible	حساس	S	8	کلروز پشت سطح اسپورزا، اسپورزایی فراوان Chlorosis behind sporulating area, abundant sporulation
Very Susceptible	خیلی حساس	VS	9	بدون نکروز یا کلروز، اسپورزایی فراوان No necrotic or chlorosis, abundant sporulation

مرحله گلدهی (Gs69) براساس مقیاس اصلاح شده کاب پیشنهادی پترسون و همکاران (Peterson *et al*., 1948) انجام شد. همچنین از واکنش گیاه (تیپ آلودگی) بر اساس روش رولفز و همکاران (Roelfs *et al*., 1992) یادداشت برداری گردید. سپس داده‌های مربوط به شدت بیماری و عکس‌العمل میزبان با هم ترکیب شد و از ترکیب آنها ضریب آلودگی محاسبه شد. ضریب آلودگی از حاصل ضرب شدت بیماری در ثابت مربوط به عکس‌العمل میزبان (Immume=0.0, R=0.2, MR=0.4, M=0.6, MS=0.8, S=1) بدست آمد (Stubbs *et al*., 1986).

محاسبه سطح زیر منحنی پیشرفت بیماری (AUDPC) بر اساس روش میلوس و لاین (Milus and Line, 1986). از فرمول زیر:

$$AUDPC = ((N_1 (X_1+X_2)/2) + (N_2 (X_2+X_3)/2))$$

محاسبه شد که در این فرمول:

AUDPC = سطح زیر منحنی پیشرفت بیماری

N_1 = فاصلهٔ اولین یادداشت‌برداری با دومین یادداشت‌برداری به روز

N_2 = فاصلهٔ دومین یادداشت‌برداری با سومین یادداشت‌برداری

x_1، x_2 و x_3 بترتیب ضریب آلودگی اولین، دومین و سومین یادداشت‌برداری می‌باشند.

همچنین برای محاسبه مقدار نسبی سطح زیر منحنی پیشرفت بیماری (rAUDPC) از فرمول زیر استفاده شد:

rAUDPC = (AUDPC هر لاین × ۱۰۰) / AUDPC رقم حساس

نرخ آلودگی ظاهری نیز مطابق روش واندرپلانک (Van der Plank, 1968) براساس فرمول زیر برای هر رقم محاسبه شد:

$$r = 1 / \Delta t[(\ln (x_2 / 1 - x_2)) - (\ln (x_1 / 1 - x_1))]$$

که در آن $\Delta t = t_2-t_1$ ، t_1 و t_2 زمان های یادداشت‌برداری و x_1 و x_2 شدت بیماری یادداشت شده در زمان‌های مذکور می‌باشد.

گروه‌بندی لاین‌ها براساس مقادیر مختلف مقاومت تدریجی به روش علی و همکاران (Ali *et al*., 2007) و پاتان و پارک (Patahn and Park, 2006) انجام شد. همبستگی بین واکنش گیاهچه‌ای و پارامترهای

مقاومت تدریجی تعیین شد. تجزیه خوشه‌ای ژنوتیپ‌های مورد مطالعه نیز به کمک نرم افزار SPSS (نسخه ۱۸) انجام گرفت.

نتایج و بحث

نتایج واکنش گیاهچه‌ای: بر اساس نتایج بررسی واکنش گیاهچه‌ای به روش لاین و قیوم (Line and Qayoum, 1992)، ۴۱ لاین امیدبخش جو در سه گروه متفاوت قرار گرفتند (جدول ۳). لاین های ۷ ،۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷،۳۰،۳۷،۴۰ و ۴۱ با تیپ‌های آلودگی کمتر از چهار به عنوان گروه مقاوم در نظر گرفته شدند. لاین‌های شماره ۱ ،۳، ۴، ۶، ۹،۱۶،۳۲،۳۳ و ۳۵ با داشتن تیپ‌های آلودگی چهار تا شش به عنوان گروه دارای مقاومت گیاهچه‌ای متوسط و ۲۳ لاین دیگر همراه با شاهد حساس با تیپ‌های آلودگی هفت یا بیشتر به عنوان گروه حساس دسته‌بندی شدند.

نتایج واکنش گیاه بالغ: بر اساس نتایج بررسی واکنش گیاه بالغ طی دو سال ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶، لاین‌ها در گروه‌های مختلفی قرار گرفتند. لاین‌های شماره ۳ ،۷، ۱۶، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷ ،۳۰،۴۰ و ۴۱ واکنش مقاومت یا نیمه‌مقاومت (R/MR) با آلودگی جزئی، و لاین‌های شماره ۵ ،۶، ۱۵، ۲۳، ۲۹،۳۱،۳۲،۳۵ و ۳۹ واکنش نیمه‌مقاومت (MR) نشان دادند. لاین‌های شماره ۱ ،۲، ۸، ۱۰، ۱۲،۱۴،۱۹،۳۳ و ۳۷ هم واکنش نیمه‌مقاومت یا متوسط (MR/M) نشان دادند. در حالیکه فقط تعداد چهار لاین (۴ ،۹، ۲۲ و ۳۸) واکنش متوسط یا نیمه‌حساسیت (M/MS) داشتند، تعداد نه لاین (۱۱ ،۱۳، ۱۷، ۱۸، ۲۰،۲۱،۲۸،۳۴ و ۳۶) همراه با شاهد حساس دارای تیپ آلودگی نیمه‌حساس تا حساس و یا حساس (MSS/S) بودند.

نتایج ارزیابی پارامترهای مقاومت تدریجی: بر اساس نتایج حاصل از ارزیابی‌های گیاهچه‌ای و گیاه بالغ نسبت به زنگ زرد، لاین‌ها درگروه‌های مختلف حساس، مقاوم و سایر سطوح مقاومت تدریجی قرار داده شدند (جدول ۳ و شکل ۱). علاوه بر این، با ارزیابی واکنش گیاهچه‌ای، ژنوتیپ‌های دارای مقاومت گیاهچه‌ای در برابر مخلوط نژادهای مورد استفاده در مزرعه نیز مشخص شدند (جدول ۳ و شکل ۱).

نتایج ارزیابی ها برای پارامتر های مقاومت نشان داد که لاین‌های EDC-87-3، EC-90-4، EM-88-2، EM-88-5، EM-89-19 همراه با رقم حساس بالاترین مقادیر FRS ، CI، r و rAUDPC را داشتند، و بنابراین به عنوان ارقام حساس گروه‌بندی شدند. ده لاین در هر دو مرحله گیاهچه‌ای و گیاه بالغ مقاوم بودند. هفت لاین در مرحله گیاهچه‌ای مقاوم ولی در مرحله گیاه بالغ واکنش متوسط (MS، M و MR) نشان دادند.

سیزده لاین (شماره‌های ۲، ۵، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۹، ۲۳، ۲۹، ۳۱، ۳۸، ۳۹) در مرحله گیاهچه‌ای حساس ولی در مرحله گیاه بالغ واکنش متوسط (MS، M و MR) نشان دادند.

جدول ۳- میانگین پارامترهای مقاومت تدریجی در مزرعه در لاین‌های امیدبخش جو نسبت به زنگ زرد جو در سال‌های ۱۳۹۵ و ۱۳۹۶

Table 3. Mean of parameters of slow rusting resistance against yellow rust in field in barley promising lines in 2016 and 2017

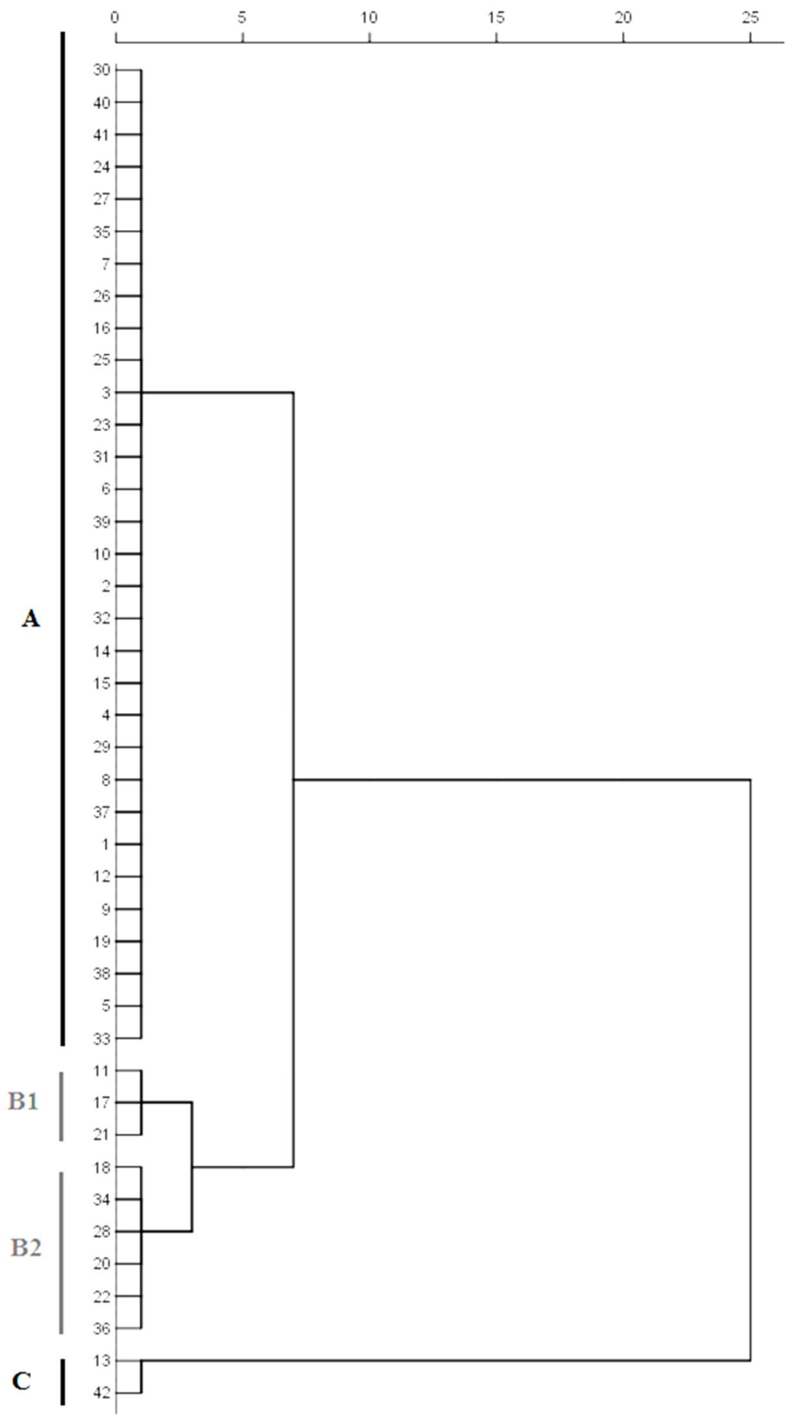
ردیف No.	لاین Line	نوع آلودگی گیاهچه Seedling IT	میانگین پارامترهای مختلف مقاومت تدریجی [1] FRS & IT[2]	CI	AUDPC	rAUDPC	r
1	EC-81-13	6	30M	18	347	26	0.052
2	EC-82-11	7	17M	10	178	13	0.048
3	EC-83-17	5	4R/MR	1.2	60	4	0.000
4	EC-84-10	6	23M/MS	16	248	19	0.075
5	EC-86-14	8	30MR	12	314	23	0.079
6	EC-87-4	6	17MR	7	199	15	0.036
7	EC-88-4	0	7R/MR	2	84	6	0.018
8	EC-88-8	7	30MR/M	15	283	21	0.088
9	EC-89-16	6	30M/MS	21	347	26	0.054
10	EC-89-18	8	17MR/M	9	199	15	0.036
11	EDC-87-3	7	63MSS	57	782	59	0.112
12	EDC-87-7	7	30M	18	347	26	0.081
13	EC-90-4	8	93MSS/S	88	1151	86	0.208
14	EC-90-5	7	17M	10	174	13	0.155
15	EC-90-7	7	17MR	7	187	14	0.052
16	EM-87-10	5	7R/MR	2	102	8	0.005
17	EM-88-2	7	67MSS	60	778	58	0.101
18	EM-88-5	8	57MSS	51	644	48	0.067
19	EM-89-10	7	33M	20	307	23	0.100
20	EM-89-14	7	47MSS	42	493	37	0.083
21	EM-89-19	7	80MSS	72	913	68	0.136
22	MD-87-16	7	47M/MSS	35	500	37	0.079
23	MD-88-15	7	20MR	12	223	17	0.048
24	MD-88-19	1	10R/MR	3	127	10	0.033
25	MD-90-10	2	7R/MR	2	93	7	0.016
26	MD-90-12	0	7R/MR	2	82	6	0.033
27	EM-90-3	1	7R/MR	2	138	10	0.016
28	EM-90-14	8	53MSS	48	593	44	0.079
29	EW-82-5	7	23MR	9	254	19	0.056
30	EW-82-13	0	R	0.2	15	1	0.000
31	EW-86-4	7	20MR	8	223	17	0.054
32	EW-86-14	5	17MR	7	178	13	0.048
33	EW-86-17	5	27M	16	297	22	0.060
34	EW-87-4	7	50MSS	45	621	46	0.047
35	EW-87-5	6	10MR	4	115	9	0.049
36	EW-88-7	7	40MSS	36	407	30	0.084
37	EW-88-16	2	27M	16	271	20	0.077
38	EW-89-5	7	33M/MS	23	313	23	0.090
39	EW-90-5	7	17MR	7	199	15	0.036
40	EW-90-14	0	R	0.2	15	1	0.000
41	EW-90-15	1	R	0.2	15	1	0.000
42	Afzal (check)	9	100S	100	1339	100	0.249

۱- پارامترهای مقاومت تدریجی شامل: تیپ آلودگی(IT) ، شدت نهائی زنگ (FRS)، ضریب آلودگی(CI)، سطح زیر منحنی پیشرفت بیماری (AUDPC)، مقدار نسبی سطح زیر منحنی پیشرفت بیماری (rAUDPC)، نرخ آلودگی ظاهری (r)

1- Slow rusting parameters including: IT = Infection type, FRS = Final Rust Severity, CI = Coefficient of Infection, AUDPC = Area Under Disease Progress Curve, rAUDPC = Relative Area Under Disease Progress Curve, r = Apparent Infection Rate

۲- تیپ آلودگی بر اساس روش رولفز و همکاران (Roelfs *et al*., 1992): مقاوم (R) - بدون اسپورزائی ، نیمه مقاوم- با آلودگی جزئی (TMR)، نیمه مقاوم (MR)- با جوش‌های کوچک احاطه شده با نواحی نکروزه، نیمه مقاوم تا نیمه حساس (M)، نیمه حساس (MS)- با جوش‌های متوسط دارای نواحی کلروزه ولی بدون نکروزه، نیمه حساس تا حساس (MSS)- با جوش‌های متوسط تا بزرگ بدون نواحی کلروزه و نکروزه، حساس (S)- با جوش‌های بزرگ بدون نواحی کلروزه و نکروزه.

2- Infection types based on Roelfs *et al*. (1992): R = Resistant without sporulation. TMR = Trace moderately resistant. MR = Moderately resistant; small pustules surrounded by necrotic areas. M = Moderately resistant to moderately susceptible, MS = Moderately susceptible; medium-sized pustules, no necrosis, but some chlorosis possible. MSS = Moderately susceptible to susceptible; medium to large sized pustules without chlorosis or necrosis, S = Susceptible, large pustules, no necrosis or chlorosis.



شکل ۱- گروه‌بندی لاین‌های امیدبخش جو بر اساس پارامترهای مقاومت تدریجی و واکنش گیاهچه‌ای نسبت به زنگ زرد با استفاده از تجزیه خوشه‌ای

Fig. 1. Denderogram of cluster analysis for barley promissing lines based on slow rusting parameters and seedling infection type to yellow rust

بنابراین لاین های فوق با داشتن مقادیر پائین پارامتر های مختلف مقاو مت به احتمال زیاد دارای درجات متفاوتی از مقاومت تدریجی یا HTAPR (مقاومت غیر نژاد- اختصاصی یا پایدار) می‌باشند. بقیه لاین‌ها سطح پایینی از مقاومت تدریجی داشتند. تجزیه خوشه‌ای بر اساس واکنش گیاهچه‌ای و گیاه بالغ، لاین‌ها را در گروه‌های مختلفی قرار داد که این حالت نیز بیانگر تنوع بالای لاین‌ها از نظر واکنش نسبت به بیماری زنگ زرد بود (شکل ۱).

روش مقایسه ضریب آلودگی به علت همبستگی با کاهش محصول در اثر آلودگی به زنگ‌های غلات به‌عنوان یکی از روش‌های مناسب ارزیابی گزارش شده است (McIntosh *et al*., 1995). به منظور محاسبه ضرایب آلودگی، ترکیب داده های شدت بیماری و واکنش میزبان استفاده شدند. براساس روش علی و همکاران (Ali *et al*., 2007) و پاتان و پارک (Patahn and Park, 2006) ارقام یا لاین‌هایی با مقادیر ضریب آلودگی ۲۰-۰، ۴۰-۲۱، ۶۰-۴۱ به ترتیب دارای سطح بالا، متوسط و پایین مقاومت تدریجی در نظر گرفته می‌شوند.

در این بررسی ۶۸ در صد از لاین‌ها در دسته اول (گروه دارای سطح بالای مقاومت تدریجی) قرار گرفتند (جدول ۳). برخی از لاین‌ها هر چند در گروه اول قرار گرفتند، ولی این لاین ها به دلیل داشتن تیپ آلودگی پایین (واکنشR) در مرحله گیاه کامل، دارای ژن/ژن های مقاومت نژاد- اختصاصی هستند، از آنجایی که ژن‌های مقاومت غیر نژاد- اختصاصی توسط ژن‌های مقاومت گیاهچه‌ای پوشیده می مانند (Chen, 2005) برای اثبات مقاومت تدریجی آنها نیاز به مطالعات تکمیلی است.

تعدادی از لاین‌ها به علت داشتن ضریب آلودگی بین ۴۰-۲۱، به عنوان لاین های دارای سطح متوسط مقاومت تدریجی گروه‌بندی شدند (جدول ۳). برخی از ارقام و لاین‌ها به علت دارا بودن ضریب آلودگی بالا (۶۰-۴۱)، دارای سطح پایین مقاومت تدریجی بودند. در این مطالعه تنها لاین‌های EDC-87-3، EC-90-4، EM-88-2، EM-88-5، EM-89-19 همراه با رقم حساس افضل ضریب آلودگی بالایی نشان دادند که در گروه حساس قرار گرفتند (جدول ۳).

با توجه به مقادیر ضریب آلودگی روی رقم حساس (جدول ۳) فشار بیماری طی سال‌های بررسی بالا بود. بعد از رقم حساس، بیشترین مقدار ضریب آلودگی ثبت شده در بین لاین‌های مورد مطالعه، مربوط به گروهی بود که در گروه دارای سطح پایین مقاومت نسبی قرار داشتند. براساس این نتایج نژاد/نژادهای زنگ زرد جو اردبیل روی بیشتر لاین‌های ارزیابی شده دارای قدرت پرآزاری و بیماری‌زایی می‌باشند (جدول۳).

براساس نتایج محققان دیگر و با توجه به واکنش گیاه بالغ لاین‌های بررسی شده دراین مطالعه، ممکن است لاین های دارای واکنش

مقاومت (R) در مرحله گیاه بالغ حامل ژن/ژن‌های مقاومت نژاد- اختصاصی یا ترکیبی از ژن/ژن‌های مقاومت نژاد- اختصاصی و ژن/ ژن‌های مقاومت غیر نژاد- اختصاصی باشند که در برابر طیف بیماری‌زایی عامل بیماری در اردبیل موثر هستند (Johnson, 1988; Ali *et al*., 2007).

توجه به این نکته ضروری است که ارقام یا لاین‌های دارای مقاومت نژاد- اختصاصی اغلب در عرض چند سال بعد از معرفی حساس می‌شوند. این حالت به علت تکامل (تطبیق دادن با میزبان و محیط) سریع نژادهای پرآزار بیمارگر است (Wan and Chen, 2012). بنابراین در خصوص لاین‌های دارای واکنش مقاومت کامل در مرحله گیاه بالغ، برای تشخیص اجزاء مقاومت آنها به مطالعه ژنتیکی یا استفاده از نشانگرهای مولکولی نیاز می‌باشد.

لاین هایی که دارای تیپ های آلودگی MS یا MR هستند ممکن است ژن‌های مقاومت از نوع پایدار را حمل کنند (Brown *et al*., 2001a; Singh *et al*., 2005). بنابراین ارقام یا لاین های دارای سطح پایین ضریب آلودگی و مولفه های دیگر مقاومت کمی به احتمال زیاد دارای ژن‌های مقاومت نسبی (مانند HTAPR یا Slow rusting) می‌باشند و مقاومت آنها می‌تواند برای مدت طولانی‌تری دوام یابد. زیرا این نوع مقاومت بوسیله بیش از یک ژن کنترل می‌شود که مقاومت چندژنی نامیده می‌شوند (Singh *et al*., 2005). ارقام یا لاین‌های دارای مقاومت تدریجی (Slow rusting) به عنوان ارقام یا لاین‌های دارای سطوح متفاوت مقاومت پایدار در نظر گرفته می‌شوند (Singh *et al*., 2011).

لاین‌هایی که دارای درجه قابل قبولی از مقاومت تدریجی هستند، سرعت پیشرفت بیماری را کاهش داده و بطور مستقیم روی تغییر نژادها اثر گذار نیستند. با وجود این، مقاومت این لاین‌ها توسط چندین ژن کوچک اثر (Minor genes) کنترل می‌شود، که غلبه بر آن در مزرعه در زمان طولانی‌تری اتفاق می‌افتد.

زنگ‌های غلات توانایی تغییر توسط عوامل مختلفی نظیر جهش (موتاسیون)، مهاجرت در مسافت‌های طولانی، نوترکیبی غیرجنسی و فشار انتخابی ژنوتیپ میزبان روی بیمارگر را دارند (Hovmoller *et al*., 2011). با توجه به این توانایی بیمارگر در تغییر پرآزاری، پژوهشگران بایستی مقاومت غیر نژاد- اختصاصی یا ترکیب مقاومت غیر نژاد- اختصاصی با مقاومت نژاد- اختصاصی را بجای استفاده تنها از مقاومت نژاد- اختصاصی بکار گیرند. البته به این نکته بایستی توجه داشت که تایید مقاومت پایدار در یک رقم مستلزم ارزیابی آن رقم در یک منطقه وسیع، و یک برهه زمانی طولانی، تحت شرایط مساعد برای بروز، استقرار و توسعه بیماری زنگ می‌باشد (Johnson, 1988).

بر اساس داده‌های شدت آلودگی نهایی (FRS)، لاین‌های بررسی شده طبق روش علی و همکاران (Ali *et al*., 2009) در این مطالعه

در سه گروه دارای مقاومت تدریجی بالا، متوسط و پایین قرار گرفتند که به ترتیب مقادیر شدت نهایی بیماری در آنها بر روی برگ پرچم ۳۰-۱٪، ۵۰-۳۱٪ و ۷۰-۵۱٪ بود. بروئرز و همکاران (Broers *et al*., 1996) و علی و همکاران (Ali *et al*., 2009b) نیز برای گروه‌بندی ارقام و لاین‌ها از ارزیابی مزرعه‌ای مقاومت کمی استفاده نمودند. این محققان دریافتند که مقاومت ارقام یا لاین‌ها بر اساس شدت نهایی بیماری و پارامترهای دیگر مقاومت نسبی از سطح خیلی پایین تا سطح خیلی بالا متغیر بود.

همبستگی واکنش گیاهچه‌ای و پارامترهای مقاومت تدریجی: در این بررسی همبستگی بین واکنش گیاهچه‌ای و پارامترهای مقاومت تدریجی نیز مورد مطالعه قرار گرفت. رابطه مثبت و معنی‌داری بین شدت نهایی آلودگی (FRS) با مقادیر ضریب آلودگی (CI)، سطح نسبی زیر منحنی پیشرفت بیماری (rAUDPC)، و نرخ آلودگی ظاهری (*r*) به ترتیب با ضریب همبستگی ۹۸، ۹۹ ، ۸۲ درصد مشاهده شد (جدول ۴).

بیشترین ضریب همبستگی بین FRS با rAUDPC و AUDPC به دست آمد (r = 0.99) و پایین‌ترین مقدار همبستگی بین ضریب آلودگی و واکنش گیاهچه‌ای و نرخ آلودگی ظاهری مشاهده شد (r= 0.54)، همبستگی مثبت و بالای مشاهده شده در این پژوهش با نتایج محققان دیگر درپاتوسیستم‌های غلات مطابقت داشت (Shah *et al*., 2010; Safavi and Afshari, 2012; Sandoval-Islas *et al*., 2007).

به عنوان مثال، می‌توان به همبستگی مثبت و معنی‌دار بین rAUDPC با پارامترهای مقاومت کمی از جمله دوره نهان آلودگی و فراوانی تولید اسپور در واحد سطح برگ اشاره کرد (Sandoval-Islas *et al*., 2007). همچنین، ضریب همبستگی بالایی بین rAUDPC و کاهش عملکرد در مطالعات محققان مختلف دیده شده است (Ochoa and parlevliet, 2007; Safavi, 2015).

در این مطالعه، ضریب همبستگی واکنش گیاهچه‌ای با پارامترهای مختلف مقاومت تدریجی پایین بود. این همبستگی پایین واکنش گیاهچه‌ای با واکنش گیاه بالغ می‌تواند به علت ماهیت متفاوت بیان ژن‌های مقاومت گیاهچه‌ای و گیاه بالغ باشد. از طرف دیگر تغییرات در فراوانی نژادی در زمان‌های یادداشت‌برداری واکنش گیاهچه‌ای و گیاه بالغ نیز در این امر می‌تواند دخالت داشته باشد.

تنوع ژنتیکی بر اساس تجزیه خوشه‌ای: تجزیه خوشه‌ای که براساس داده‌های واکنش مرحله گیاه بالغ و گیاهچه‌ای انجام گرفت، سه گروه اصلی را برای لاین‌های مورد مطالعه مشخص ساخت (شکل ۱). رقم افضل و لاین EC-90-4 با بیشترین فاصله ژنتیکی از بقیه لاین‌ها جداشدند و در گروه جداگانه‌ای قرار گرفتند (گروه C)، بقیه لاین‌ها در دو گروه

جدول ۴- ضرایب همبستگی خطی بین واکنش گیاهچه‌ای و پارامترهای مقاومت تدریجی نسبت به زنگ زرد در ۴۱ لاین امیدبخش جو

Table 4. Linear correlation coefficients between slow rusting parameters and seedling infection type to yellow rust for 41 barley promising lines

Parameter[1]	*r*	FRS	CI	Seedling IT	rAUDPC
FRS	0.84**	-			
CI	0.82**	0.98**	-		
Seedling IT	0.60**	0.62**	0.54**	-	
rAUDPC	0.84**	0.99**	0.98**	0.58**	-
AUDPC	0.84**	0.99**	0.99**	0.58**	0.99**

**: معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد.

**: Significant at the 1% probability level.

۱- پارامترها شامل: شدت نهائی زنگ (FRS)، ضریب آلودگی (CI)، تیپ آلودگی (IT) گیاهچه ای، مقدار نسبی سطح زیر منحی پیشرفت بیماری (rAUDPC) سطح زیر منحنی پیشرفت بیماری (AUDPC)، نرخ آلودگی ظاهری (R)

1- FRS: Final Rust Severity, CI: Coefficients of Infection, Seedling Infection Type, rAUDPC: Relative Area under Disease Progress Curve, AUDPC: Area under Disease Progress Curve, *r*: Apparent Infection Rate.

اصـــلی A و B و دو گروه فرعی B1 و B2 قرار گرفتند.

در گروه اصلی A، **۳۳** لاین که دارای مقادیر پایین واکنش گیاه بالغ و بنابراین ســطح مطلوب تا متوسـط مقاومت تدریجی بودند، قرار گرفتند. در گروه اصـــلی دوم (B) دو زیر گروه قرار گرفتند، در زیر گروه اول ســه لاین قرار گرفتند که دارای مقادیر بالای پارامتر های مقاو مت تدریجی بودند و در گروه حســاس قرار گرفتند (گروه B1). در زیر گروه دوم نیز شــش لاین با مقادیر بالای داده‌های واکنش گیاه بالغ، دارای سطح پایین مقاومت تدریجی بودند (گروه B2).

تنوع بین لاین‌ها بر اســاس داده‌های واکنش گیاهچه‌ای و گیاه بالغ بالا بود و تجزیه خو شه‌ای بر اســاس داده های بیماری این تنوع را تایید کردکـه اشـــاره بـه تنوع ژنتیکی بـالا در بین لاین‌هـای مورد مطالعـه دارد. علی و همکـاران (Ali *et al.*, 2009a) و دولتخواه و همکـاران (Dolatkhah *et al.,* 2016) هـم بـر اســـاس داده‌هـای مختلف بیمـاری، تنوع بـالایی را بین ارقام یا لاین‌های گندم مورد مطالعه نســبت به زنگ زرد گزارش کردند.

تنوع ژنتیکی مشــاهده شــده در این مطالعه، می‌تواند در برنامه‌های به نژادی نســبت به زنگ زرد جو بکار گرفته شود. این کار از کشت ارقام دارای تنوع ژنتیکی پایین در مقاومت نســبت به زنگ زرد جلوگیری خواهد کرد. با این اقدام و به منظور افزایش پایداری مقاومت ارقام جو در آینده، می‌بایســت از کشــت ارقامی که تنوع ژنتیکی مقـاومـت در میـان آنهـا پـایین اســـت خودداری نمود و تا آنجایی که امکان دارد تنوع ژنتیکی ارقام را در برنامه های به‌نژادی به منظور

پهنه‌بندی صحیح کشت ارقام در مناطق هدف افزایش داد.

نتیجه‌گیری کلی: نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که لاین های مورد مطالعه واکنش های متفاوتی نسبت به زنگ زرد نشان دادند که از کاملاً مقاوم تا حساس متغیر بود. بیشتر لاین‌های ارزیابی شده تحت شرایط آلودگی بالا واکنش متوسطی (نیمه‌مقاومت تا نیمه‌حساسیت) نسبت به بیماری نشان دادند. در بین لاین‌های بررسی شده تیپ‌های مقاومت از نوع مقاومت کامل (نژاد- اختصاصی) و مقاومت تدریجی (غیر نژاد- اختصاصی) مشاهده گردید.

سیزده لاین (شامل شماره‌های ۲، ۵، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۵، ۱۹، ۲۳، ۲۹، ۳۱، ۳۸ و ۳۹) که در مرحله گیاهچه‌ای حساس و در مرحله گیاه بالغ واکنش متوسط (*MS*، *M* و *MR*) نشان دادند، به احتمال زیاد دارای درجات متفاوتی از مقاومت تدریجی (مقاومت غیر نژاد- اختصاصی یا پایدار) می‌باشند. بایستی توجه داشت ارقامی که دارای مقاومت تدریجی با واکنش نیمه حساس هستند، ممکن است مقاومت شان جهت حفاظت گیاه نسبت به بیماری پایین باشد که در این صورت می‌بایست برنامه مدیریت تلفیقی با بیماری را برای چنین ارقامی بکار برد.

در صورت جمع شدن چهار تا پنج ژن مقاومت غیر نژاد- اختصاصی، مقاومت این لاین ها نزدیک به مقاومت کامل یا مصون خواهد بود. این لاین‌ها می‌توانند برای معرفی انتخاب شده و یا در برنامه‌های به‌نژادی مورد استفاده قرار گیرند. در معرفی ارقام جو علاوه بر تاکید بر مقاومت پایدار نسبت به زنگ زرد، بهتر است مقاومت پایدار نسبت به بیماری‌های مهم دیگر جو نیز مد نظر قرار گیرد تا ارقام از تولید با ثبات و پایدار برخوردار شوند.

سپاسگزاری

نگارندگان این مقاله از مدیریت بخش تحقیقات غلات مؤسسه تحقیقات اصلاح و تهیه نهال و بذر و مدیریت مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان اردبیل که در فراهم آوردن امکانات لازم برای اجرای این پروژه ما را یاری کردند، تشکر و سپاسگزاری می‌کنند.

References

Ali, S., Shah, S. J. A., and Ibrahim, M. 2007. Assessment of wheat breeding lines for slow yellow rusting (*Puccinia striiformis* West. *tritici*). Pakistan Journal of Biological Sciences 10: 3440-3444.

Ali, S., Shah, S. J. A., and Rahman, H. 2009a. Multi-location variability in Pakistan for partial resistance in wheat to *Puccinia striiform*is f. sp. *tritici*. Phytopathologia Mediterrania 48: 269-278.

Ali, S., Shah, S. J. A., Khalil, I. H., Rahman, H., Maqbool, K., and Ullah, W. 2009b. Partial resistance to yellow rust in introduced winter wheat germplasm at the north of Pakistan. Australian Journal of Crop Science 3: 37-43.

Anonymous. 2016. Agriculture production. FAOSTAT Agriculture Data. http: //www.fao.org.

Badebo, A., Stubbs, R. W., Van Ginkel, M., and Gebeyehu, G. 1990. Identification of resistance genes to *Puccinia striiformis* in seedlings of Ethiopian and CIMMYT bread wheat varieties and lines. Netherlands Journal of Plant Pathology 96: 199-210.

Bahl, P. N., and Bakshi, J. S. 1963. Genetics of rust resistance in barley- II. The inheritance of seedling resistance to four races of yellow rust. Indian Journal of Genetics and Plant Breeding 23: 150–154.

Broers, L.H.M., Cuesta-Subias, X., and Lopez-Atilano, R. M. 1996. Field assessment of quantitative resistance to yellow rust in ten spring bread wheat cultivars. Euphytica 90: 9-16.

Brown, W. M. J., Hill, J. P., and Velasco, V. R. 2001a. Barley yellow rust in North America. Annual Review of Phytopathology 39: 367-384.

Brown, W. M., Hill, J. P., and Velasco, V. R. 2001b. Identification of barley rust resistance in the Americas: A case study of successful international cooperation. Pp. 8-9. In: Proceedings of the First Regional Yellow Rust Conference for Central and West Asia and North Africa.

Capettini, F. 2005. Barley in Latin America. Pp. 121-126. In: Grando, S., and Macpherson, H. G. (eds.) Food barley: Importance, uses and local knowledge. Proceedings of the International Workshopon Food Barley Improvement.

Chen, X. M. 2007. Challenges and solutions for stripe rust control in the United States. Australian Journal of Agricultural Research 58: 648-655.

Chen, X. M. 2008. Races of *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei* in the United States from 2004 to 2007. Barley Newsletter 51: WABNL51.

Chen, X. M., and Line, R. F. 2003. Identification of genes for resistance to *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei* in 18 barley genotypes. Euphytica 129: 127-145.

Chen, X. M., Line, R. F., and Leung, H. 1995. Virulence and polymorphic DNA relationships of *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei* to other rusts. Phytopathology 85: 1335-1342.

Dehghani, H., and Moghaddam, M. 2004. Genetic analysis of latent period of stripe rust in wheat seedlings. Journal of Phytopathology 122: 325-330.

Dolatkhah, T., Torabi, M., and Safavi, S. A. 2016. Evaluation of partial resistance

components in some promising wheat lines of cold climate zone to yellow rust disease in field condition in Ardebil, Iran. Seed and Plant Improvement Journal 32: 347-367.

Dracatos, P. M., Khatkar, M. S., Singh, D., Stefanato, F., Park, R. F., and Boyd, L. A. 2016. Resistance in Australian barley (*Hordeum vulgare*) germplasm to the exotic pathogen *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*, causal agent of stripe rust. Plant Pathology 65: 734-743.

Dubin, H. J., and Stubbs, R. W. 1986. Epidemic spread of barley stripe rust in South America. Plant Disease 70: 141-144.

Esfandiari, E. 1947. Les rouilles de cereales en Iran [Cereal rusts in Iran]. Applied Entomology and Phytopathology 4: 67-76.

Esvelt Klos, K., Gordon, T., Bregitzer, P., Hays, P., Chen, X. M., del Blanco, I. A., and Bonman, J. M. 2016. Barley stripe rust resistance QTL: Development and validation of SNP markers for resistance to *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*. Phytopathology 106: 1344-1351.

Golegaonkar, P. G., Singh, D., and Park, R. F. 2009. Evaluation of seedling and adult plant resistance to *Puccinia hordei* in barley. Euphytica 166 (2): 83-197.

Gulati, S. C., Varma, N. S., Jdin, K. B. L., and Chaudhary, H. B. 1988. Sources of resistance to yellow rust (*Puccinia striiformis* West.) in barley. Indian Journal of Genetics and Plant Breeding 48: 271-274.

Gyawali, S., Verma, R. P. S., Kumar, S., Bhardwaj, S. C., Gangwar, O. P., Selvakumar, R., Shekhawat, P. S., Rehman, S., and Sharma-Poudyal, D. 2018. Seedling and adult plant stage resistance of a world collection of barley genotypes to stripe rust. Journal of Phytopathology 166 (1): 18-27.

Herrera-Fossel, S. A., Singh, R. P., Huerta-Espino, J., Crossa, J., Djurle, A., and Yuen, J. 2007. Evaluation of slow rusting resistance components to leaf rust in CIMMYT durum wheats. Euphytica 155: 361-369.

Hovmøller, M. S., Sørense, C. K., Walter, S., and Justesen, A. F. 2011. Diversity of *Puccinia striiformis* on Cereals and Grasses. Annual Review of Phytopathology 49: 197-217.

Johnson, R. 1988. Durable resistance to yellow (stripe) rust in wheat and its implications in plant breeding. Pp. 63-75. In: Simmonds, N. W. and Rajaram, S. (eds.) Breeding strategies for resistance to the rusts of wheat. CIMMYT, Mexico, D. F.

Kilpatrick, R. A. 1975. New cultivars and longevity of rust resistance, 1971-1975. United States Agricultural Research Service ARS-NE 64: 20pp.

Line, R. F., and Qayoum, A. 1992. Virulence, aggressiveness, evolution, and

distribution of races of *Puccinia striiformis* (the cause of stripe rust of wheat) in North America, 1968-87. USDA-ARS Technical Bulletin 1788. 44pp.

Line, R. F. 2002. Stripe rust of wheat and barley in North America: A retrospective historical review. Annual Review of Phytopathology 40: 75-118.

Luthra, J. K., and Chopra, V. L. 1990. Genetics of stripe rust resistance in barley. Indian Journal of Genetics 50: 390-395.

Mathur, A. K., and Siradhana, B. S. 1990. Screening of indigenous and exotic barley germplasm against indian races of yellow rust. Indian Journal of Mycology and Plant Pathology 20: 182.

McIntosh, R. A., Wellings, C. R., and Park, R. F. 1995. Wheat Rusts: An Atlas of Resistance Genes. CSIRO, Australia, 200pp.

Milus, E. A., and Line, R. F. 1986. Gene action for inheritance of durable, high–temperature, adult plant resistances to stripe rust in wheat. Phytopathology 76: 435-441.

Moshiri, Sh. 1995. Determination of resistance sources to common barley diseases in Khorasan. Pp. 53. In: Proceedings of the 12th Iranian Plant Protection Congress.

Newman, C. W., and Newman, R. K. 2006. A brief history of barley foods. Cereal Food World 51(1): 4-7.

Ochoa, J., and Parlevliet, J. E. 2007. Effect of partial resistance to barley leaf rust, *Puccinia hordei,* on the yield three barley cultivars. Euphytica 153: 309-312.

Park, R. F. 2008. Breeding cereals for rust resistance in Australia. Plant Pathology 57: 591-602.

Pathan, A. K., and Park, R. F. 2006. Evaluation of seedling and adult plant resistance to leaf rust in European wheat cultivars. Euphytica 149: 327-342.

Peterson, R. F., Campbell, A. B., and Hannah, A. E. 1948. A diagrammatic scale for estimating rust intensity of leaves and stems of cereals. Canadian Journal of Research 26: 496-500.

Roelfs, A. P., and Huerta- Espino, J. 1994. Seedling resistance in *Hordeum* to barley stripe rust from Texas. Plant Disease 78: 1046-49.

Roelfs, A. P., Singh, R. P., and Saari, E. E. 1992. Rust diseases of wheat: Concepts and Methods of Diseases Management. CIMMYT, Mexico, D. F. 81pp.

Safavi, S. A. 2015. Effects of yellow rust on yield of race-specific and slow rusting resistant wheat genotypes. Journal of Crop Protection 4: 395-408.

Safavi, S. A., Babai Ahari, A., Afshari, F., and Arzanlou, M. 2010. Slow rusting resistance in 19 promising wheat lines to yellow rust in Ardabil, Iran. Pakistan Journal

of Biological Sciences 13: 240-244.

Safavi, S. A., and Afshari, F. 2012. Quantitative resistance of some elite wheat lines to *Puccinia striiformis* f. sp. *Tritici*. Archives of Phytopathology and Plant Protection 45: 740-749.

Safavi, S. A., Babai-Ahari, A., Afshari, F., and Arzanlou, M. 2012. Effect of yellow rust on yield components of barley cultivars with race-specific and slow rusting resistance to yellow rust. Archives of Phytopathology and Plant Protection 45:1488-1498.

Safavi, S. A., Babai-Ahari, A., Afshari, F., and Arzanlou, M. 2013. Slow rusting resistance in Iranian barley cultivars to *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*. Journal of Plant Protection Research 53: 5-11.

Safavi, S. A., and Mohammadzadeh, J. 2013. Race non-specific resistance to yellow rust in some promising wheat lines. Cereal Research 3: 197-209.

Safavi, S. A., Babai Ahari, A., Afshari, F., and Arzanlou, M. 2014. Virulence genes and pathotypes of *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei* causing yellow rust on barley in some areas of Iran. Seed and Plant Improvement Journal 30: 733-760.

Sandhu, K. S., Forrest, K. L., Kong, S., Bansal, U. K., Singh, D., Hayden, M. J., and Park, R. F. 2012. Inheritance and molecular mapping of a gene conferring seedling resistance against *Puccinia hordei* in the barley cultivar Ricardo. Theoretical and Applied Genetics 125 (7): 1403-1411.

Sandoval-Islas, J. S., Broers, L. H. M., Vivar, H., and Osada, K. S. 1998. Evaluation of quantitative resistance to yellow rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *hordei)* in the ICARDA/CIMMYT barley breeding programe. Plant Breeding 117: 127-130.

Sandoval-Islas, J. S., Broers, L. H. M., Mora-Aguilera, G., Parlevliet, J. E., Osada, K. S. and Vivar, H. E. 2007. Quatitative resistance and its components in 16 barley cultivars to yellow rust, *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei*. Euphytica 153: 295-308.

Shah, S. J. A., Muhmmad, M., and Hussain, S. 2010. Phenotypic and molecular characterization of wheat for slow rusting resistance against *Puccinia striiform*is Westend. f. sp. *tritici.* Journal of Phytopathology 158: 393-402.

Sharma-Poudyal, D., Chen, X. M., Wan, A. M., Zhan, G. M., Kang, Z. S., Cao, S. Q., Jin, S. L., Morgounov, A., Akin, B., Mert, Z., Shah, S. J. A., Bux, H., Ashraf, M., Sharma, R. C., Madariaga, R., Puri, K. D., Wellings, C., Xi, K. Q., Wanyera, R., Manninger, K., Ganzález, M. I., Koyda, M., Sanin, S. and Patzek, L. J. 2013. Virulence characterization of international collections of the wheat stripe rust pathogen, *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici.* Plant Disease 97: 379-386.

Sherchand, K., and Yoshida, M. 1996. Evaluation and characterization of hull-less barley germplasm in Nepal. Rachis 15: 1-6.

Singh, D., Dracatos, P., Derevnina, L., Zhou, M., and Park, R. F. 2015. Rph23: A new designated additive adult plant resistance gene to leaf rust in barley on chromosome 7H. Plant Breeding 134: 62-69.

Singh, R. P., Huerta-Espino, J., Bhavani, S., Herrera-Foessel S. A., Singh D., Singh, P. K., Velu, G., Mason, R. E., Jin, Y., Njau, P. and Crossa, J. 2011. Race non-specific resistance to rust diseases in CIMMYT spring wheats. Euphytica 179: 175-186.

Singh, R. P., Huerta-Espino, J., and William, H. M. 2005. Genetics and breeding for durable resistance to leaf and stripe rusts in wheat. Turkish Journal of Agriculture and Forestry 29 (2): 121-127.

Stubbs, R. W., Prescott, J. M., Saari, E. E., and Dubin, H. J. 1986. Cereal disease methodology manual. CIMMYT: Mexico, D. F. 46pp.

Van der Plank, J. E. 1968. Disease resistance in plants. New York, Academic Press. 206pp.

Wan, A. M., and Chen, X. M. 2012. Virulence, frequency, and distribution of races of *Puccinia striiform*is f. sp. *tritici* and *Puccinia striiformis* f. sp. *hordei* identified in the United States in 2008 and 2009. Plant Disease 96: 67-74.

Zeng, Q. D., Han, D. J., Wang, Q. L., Yuan, F. P., Wu, J. H., Zhang, L., Wang, X. J., Huang, L. L., Chen, X. M., and Kang, Z. S. 2014. Stripe rust resistance and genes in Chinese wheat cultivars and breeding lines. Euphytica 196: 271-284.